

ANALYSE ET SYNTHÈSE DE DOCUMENTS TECHNIQUES ET SCIENTIFIQUES

Durée : 2 heures 30 minutes

L'usage d'abaques, de tables, de calculatrice et de tout instrument électronique susceptible de permettre au candidat d'accéder à des données et de les traiter par les moyens autres que ceux fournis dans le sujet est interdit.

Chaque candidat est responsable de la vérification de son sujet d'épreuve : pagination et impression de chaque page. Ce contrôle doit être fait en début d'épreuve. En cas de doute, le candidat doit alerter au plus tôt le surveillant qui vérifiera et, éventuellement, remplacera le sujet.

Chaque candidat doit aussi vérifier que le sujet qui lui est donné **correspond à la thématique qu'il a choisie lors de son inscription au concours**. En cas de doute, il doit alerter au plus tôt le surveillant qui vérifiera et, éventuellement, remplacera le sujet.

Ce sujet comporte la présente page de garde et un texte de 5 pages numérotées de 1 à 5.

Thématique agroalimentaire :

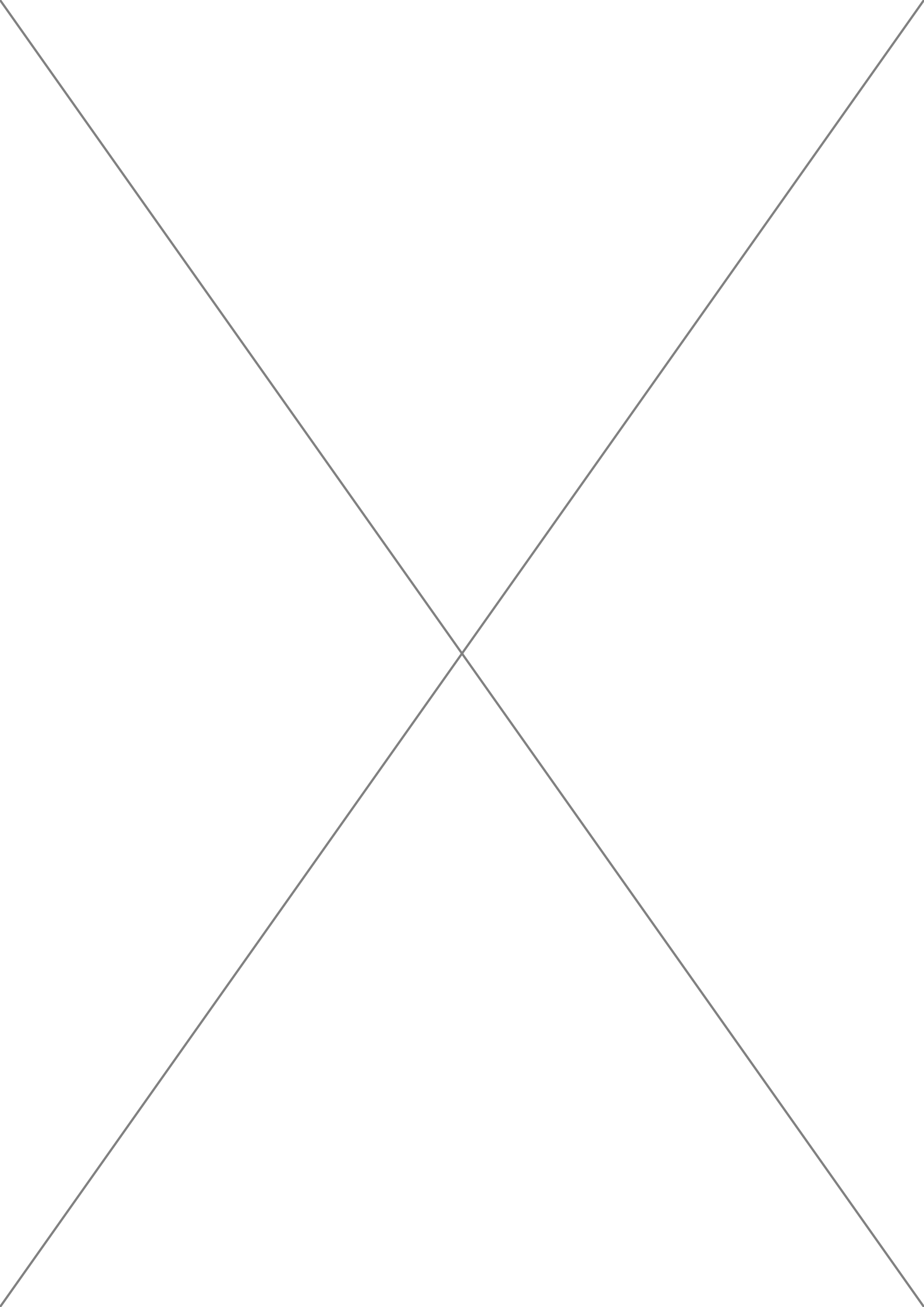
ÉCONOMISER L'EAU DANS L'AGROALIMENTAIRE

Sylvie Lortal, Christine Faille, Thierry Bénézech, chercheurs INRAe.

Article paru sur le site www.h2o.net

L'épreuve est composée de deux parties :

- **1^{ère} partie (sur 10 points) : faites l'analyse et la synthèse des idées fortes du document;**
- **2^e partie (sur 10 points) : développez une des idées importantes du document en l'illustrant et en valorisant vos connaissances techniques et scientifiques.**



ÉCONOMISER L'EAU DANS L'AGROALIMENTAIRE

Sylvie Lortal, Christine Faille, Thierry Bénézech, chercheurs INRAe.

L'usage d'eau dans l'industrie — toutes filières confondues — représente près de 20 % de la consommation d'eau dans le monde. Les industries agroalimentaires n'en sont pas les plus grandes consommatrices mais elles font partie des grands utilisateurs et elles sont particulièrement exigeantes sur la qualité de l'eau utilisée. Par exemple, il faut 1,5 litre d'eau pour un litre de lait traité en usine, et 20 litres pour la production d'un kilogramme de salade en sachet.

Gérer l'eau est un réel enjeu de recherche : il s'agit de réduire les coûts et l'impact environnemental en diminuant les consommations et en réduisant les rejets polluants. À ce titre, les chercheurs de l'INRAe consacrent une partie de leurs travaux à l'optimisation des procédés industriels pour économiser l'eau. Des solutions sont étudiées : diminuer les pertes par la mise en place d'outils de mesure et le contrôle des procédures ; récupérer et valoriser l'eau alimentaire ; régénérer les fluides techniques, comme les solutions de nettoyage en place ; améliorer les méthodes de nettoyage pour arriver à nettoyer moins longtemps et avec moins d'eau. Cet article illustre quelques pistes de travail.

EXTRAIRE L'EAU DU LAIT

Pour les industries agroalimentaires, le séchage est une opération délicate : mal conduite, elle peut entraîner la non-conformité du produit et des pertes économiques substantielles. Les chercheurs de l'INRAe ont développé un logiciel de prédiction des paramètres de séchage du lait par pulvérisation, le SD2P, Spray Drying Parameters Simulation & Determination. Augmentant la productivité du procédé de séchage, le logiciel fait déjà l'objet de 19 licences à destination des principales industries laitières mondiales. Il est actuellement en phase de test dans d'autres industries alimentaires et pharmaceutiques.

25 % de l'énergie totale consommée par l'industrie laitière produisant des poudres de lait sont utilisés pour extraire l'eau du lait. Déshydrater le lait allonge sa durée de conservation et réduit volumes et coûts de transports. Pour cette déshydratation, l'industrie laitière utilise la technique d'évaporation sous vide, suivie d'un séchage par pulvérisation, dit atomisation. Ce séchage consiste à pulvériser un produit dans un courant d'air chaud et sec avec un impact plus ou moins considérable sur la qualité des poudres laitières suivant la conduite du procédé. Mais cette extraction d'eau d'un produit agro-alimentaire est un procédé délicat : mal réalisé, il dénature les propriétés organoleptiques du produit. Or, il n'existe pas à ce jour de méthodes permettant de déterminer précisément *a priori* les paramètres de séchage pour des produits laitiers. La plupart des industriels laitiers ont acquis empiriquement ces connaissances en déterminant *a posteriori* leurs paramètres de fonctionnement. Mais ces essais sont complexes, coûteux et doivent être reconduits pour chaque nouveau produit.

Afin que ce procédé puisse gagner en productivité (quantité de poudre produite par heure) et en qualité, il est devenu nécessaire de modéliser la manière dont les concentrés, en fonction de leurs propriétés physico chimiques et thermodynamiques, s'évaporent et

sèchent. Pour répondre au besoin de l'industrie, l'INRAe, en collaboration avec la laiterie de Montaigu, étudie depuis dix ans ces transferts d'eau au cours du séchage.

À l'aide d'un système expérimental original, l'équipe a déterminé les différentes vitesses d'élimination d'eau au sein du produit. Ces recherches ont abouti à la mise au point en 2005 d'une méthode couplée à un logiciel. Modélisant les principaux paramètres du procédé selon les caractéristiques des fractions concentrées (interaction eau-constituants) à sécher, le logiciel prévoit son comportement au séchage avec une précision sur les températures d'entrée et de sortie supérieure à 95 % (de l'ordre d'un à deux degrés). Commercialisé auprès des industries laitières en 2008, ce logiciel permet d'améliorer et d'optimiser la productivité du séchage de 5 à 25 % ainsi que les coûts énergétiques associés. Les principaux groupes laitiers mondiaux en sont aujourd'hui équipés : plus de 10 % du volume de lait mondial en poudre transite ainsi par le logiciel de séchage le SD2P.

Ce logiciel protégé s'adresse à l'heure actuelle à l'industrie laitière. Mais des recherches complémentaires ont validé cette démarche à d'autres produits agro-alimentaires, voire pharmaceutiques. L'équipe a notamment réalisé des expériences concluantes sur le séchage de la maltodextrine, de la gélatine, mais aussi de l'œuf, de l'alimentation animale, du sang et des hydrolysats de poissons... De nombreux utilisateurs industriels, concepteurs de tours de séchages ou chercheurs, s'intéressent aujourd'hui au développement et à l'application de ce logiciel dans d'autres domaines.

VERS UNE MEILLEURE EFFICACITÉ DES PROCÉDURES DE NETTOYAGE DANS LES INDUSTRIES ALIMENTAIRES

Assurer la sécurité sanitaire des produits transformés est au cœur des préoccupations des industries agroalimentaires. Tout en minimisant les coûts et l'impact environnemental, les industriels doivent mettre en place des procédures de nettoyage efficaces de leurs équipements. Des scientifiques de l'INRAe de Lille et de l'université de Nantes travaillent sur le sujet avec pour objectif final de limiter la consommation d'eau et les rejets dans les procédés de nettoyage pour répondre à des critères de qualité, de flexibilité, de santé, et de respect de l'environnement.

DES ENZYMES POUR UN NETTOYAGE À FOND

Les biofilms sont des pellicules bactériennes visqueuses qui adhèrent aux surfaces des équipements industriels dans l'agroalimentaire. Résistants aux méthodes classiques de nettoyage, ils sont incriminés dans 40 % des toxi-infections alimentaires en France. Leur élimination classique requiert des nettoyages approfondis et consommateurs d'eau.

Véritables réservoirs de micro-organismes (bactéries, champignons...) adhérant entre eux et englobés dans une gangue de polymères (polysaccharides, protéines, ADN, lipides et minéraux), les biofilms colonisent toutes les surfaces industrielles, les canalisations, les filtres à membrane... Pour les nettoyer et les éliminer, il est essentiel de déstructurer cette gangue. Le problème est que les biofilms sont très résistants et les détergents classiques comme la soude ne sont pas assez efficaces. De plus, leurs formules chimiques agressives représentent un danger pour les utilisateurs, sont corrosives pour le matériel, et ont un impact négatif sur l'environnement.

« Nous étudions la formation des souillures et leur décrochement dans les chaînes de transformation des aliments afin de pouvoir améliorer les conditions d'hygiène. Nous avons collaboré avec la société Realco dans le cadre du projet Eureka. Notre contribution a porté sur les recherches en amont pour déterminer les souches bactériennes les plus aptes à former des biofilms résistants. Notre unité étudie également les conditions environnementales influençant le développement et la résistance des biofilms en industrie et les activités enzymatiques les plus efficaces contre ces biofilms. La résistance des biofilms dépend des microorganismes qui les composent », explique Christine Faille, directrice de l'unité PIHM (Processus aux interfaces et Hygiène des matériaux). La valeur ajoutée du laboratoire INRAe PIHM, dans son partenariat avec Realco, repose sur son expertise dans l'étude des processus microbiens, chimiques et physiques entrant en jeu dans la formation et le décrochement des biofilms. Grâce à de nombreux équipements, l'unité travaille sur des échelles d'études très différentes allant des analyses microscopiques à des essais en boucle pilote dans une halle technique de 800 m². Ces atouts lui permettent de fournir aux industriels des éléments objectifs pour l'amélioration de leurs procédés de transformation grâce à une meilleure compréhension des phénomènes de contamination et de nettoyage des surfaces et des mécanismes impliqués. La solution proposée est fondée sur l'utilisation d'enzymes.

Les enzymes utilisées sont des protéines qui dégradent la matière organique en résidus de petite taille, solubles dans l'eau, donc facilement décrochables. Les chercheurs de l'INRAe ont d'abord sélectionné neuf souches bactériennes capables de former des biofilms résistants dans différents milieux alimentaires et cinq activités enzymatiques pour leur efficacité contre ces biofilms. Les résultats effectués sur des coupons d'acier inoxydable ont mis en évidence le rôle majeur des polysaccharidases contre les biofilms de type *Pseudomonas fluorescens* et des protéases contre les biofilms de *Bacillus*. La combinaison de ces activités enzymatiques à des tensioactifs à pH alcalin a permis d'améliorer le nettoyage des biofilms quelque soit l'espèce. « Un pH alcalin, pH 10, est ce qui fonctionne le mieux dans le nettoyage des biofilms, quelque soit le milieu alimentaire » conclut la directrice du laboratoire lillois.

À partir de ces résultats, la société Realco a élaboré une solution enzymatique de nettoyage qui a été testée à l'INRAe. « Nous avons testé ces solutions enzymatiques sur des pièces en acier inoxydable présentant des singularités de géométrie difficiles à nettoyer. Nous pouvons ainsi étudier le décrochement des biofilms à l'échelle semi-industrielle, dans des conditions proches de celles des industries agroalimentaires », explique Christine Faille. Le détergent enzymatique, utilisé à 45 °C, a montré une efficacité de nettoyage supérieure à un traitement à la soude 0,5 % à 45 °C pour tous les biofilms et similaire à un traitement à la soude 2 % à 60 °C pour les biofilms de *Bacillus cereus*. Des essais sur sites industriels, menés par la société Realco, ont confirmé l'efficacité du nouveau cocktail enzymatique. Comparativement aux traitements classiques à la soude, l'utilisation du BioREM 10 limite la consommation d'énergie (température d'utilisation préconisée : 50 °C) ainsi que les rejets de détergents. Les enzymes présentent aussi l'avantage d'être biodégradables, et ont donc un moindre impact sur l'environnement. La préparation enzymatique représente donc une alternative écologique aux traitements chimiques, susceptible de séduire de plus en plus les entreprises agroalimentaires s'inscrivant dans une démarche de développement durable.

UN NETTOYAGE TURBULENT

Pour lutter contre les biofilms, les aspects mécaniques du nettoyage peuvent être aussi étudiés. Ainsi, les scientifiques cherchent à comprendre les mécanismes se déroulant aux interfaces bactéries-aliment et matériau. Ils étudient en particulier les écoulements turbulents. La turbulence désigne l'état d'un fluide, liquide ou gaz, dans lequel la vitesse d'écoulement de ce fluide présente en tout point un caractère fluctuant. C'est souvent le cas pour les fluides nettoyants circulant dans les installations industrielles.

Il est possible de jouer avec ces conditions de turbulence et de s'en servir comme outils pour améliorer l'élimination des souillures, et donc le nettoyage des surfaces. Ainsi, des stratégies adaptées comme les débits pulsés permettent clairement d'optimiser les procédures de nettoyage, notamment en ce qui concerne les contaminations sous forme de spores bactériennes particulièrement adhérentes et résistantes. Le laboratoire PIHM de l'INRAe de Villeneuve d'Ascq et l'unité mixte de recherche de l'Université de Nantes / CNRS GEPEA (Génie des procédés Environnement et Agroalimentaire) ont démontré que des conditions précises de pulsation des écoulements permettent une élimination efficace des bactéries lors des procédures de nettoyage.

Les microbes présents sur les surfaces en acier inoxydable sont mieux éliminés en variant l'intensité et l'amplitude des pulsations lors du processus de nettoyage. Un nettoyage avec débit pulsé permet la réduction de l'énergie de pompage, de la durée du nettoyage et de la concentration des solutions détergentes tout en conservant une efficacité du nettoyage aussi bonne sinon meilleure que dans les conditions classiques utilisées en industries. Il s'agit d'un réel intérêt économique pour les industriels. Les chercheurs ont observé pour des équipements de formes géométriques simples installés sur un démonstrateur pilote de Villeneuve d'Ascq que faire varier de façon séquentielle les flux de nettoyants était plus efficace et permettait d'envisager une réduction de la facture énergétique. Les chercheurs ont ainsi prouvé que les écoulements pulsés sont efficaces pour des équipements de géométries simples, et des travaux complémentaires semblent déjà démontrer que c'est aussi le cas sur des équipements plus complexes (coudes et changements de diamètres, échangeurs de chaleur...).

VERS UNE RÉGÉNÉRATION DES SOLUTIONS DE NETTOYAGE EN PLACE DANS LES INDUSTRIES AGROALIMENTAIRES

Les opérations de « nettoyage en place » des équipements alimentaires sont encore majoritairement conduites de manière empirique, avec des paramètres utilisés par excès (temps, concentration en détergent des solutions) et des renouvellements de principe, par exemple hebdomadaire des solutions de nettoyage. Elles conduisent ainsi à une surconsommation d'eau et de produits chimiques, majoritairement de la soude (environ 120 tonnes par an pour une usine produisant 1 million de litres de lait par jour). Dans ce contexte, les chercheurs de l'unité mixte de recherche de l'INRAe / Agrocampus Ouest, STLO (Science et Technologie du Lait et de l'œuf) à Rennes se sont intéressés à la recherche de stratégies de révision des phases de nettoyage. Ils ont montré qu'il était possible de « régénérer » les solutions de nettoyage alcalines tout en améliorant leur efficacité!

Quels que soient le système de nettoyage en place et le type d'atelier considérés, lors des utilisations successives des solutions de soude industrielles, l'augmentation de la concen-

tration en pollution (demande chimique en oxygène, DCO¹) des solutions s'accompagne d'une diminution rapide de la tension superficielle. Ces faibles valeurs, semblables à celles des solutions détergentes commerciales, résultent de la saponification de la matière grasse en savons d'acides gras et de l'hydrolyse des protéines en peptides et acides aminés. Les chercheurs ont montré que l'abaissement de la tension superficielle des solutions conjuguée à l'absence de matières en suspension exerce une action positive sur le nettoyage de membrane de filtration : l'action des solutions régénérées est aussi efficace que celle d'un détergent alcalin du commerce, reconnu plus efficace que la soude « propre ». Parmi les opérations d'épuration (microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration), la microfiltration tangentielle s'est révélée la plus efficace pour éliminer les matières en suspension, y compris économiquement, avec des temps de retour sur investissement inférieurs à deux ans. La microfiltration génère cependant un niveau élevé de DCO soluble, dont l'impact reste à quantifier.

Ces résultats offrent des perspectives de retombées économiques importantes pour le nettoyage des installations industrielles en acier inoxydable. La détermination des limites de la régénération des solutions de soude sur plusieurs semaines (effet de la DCO, développement bactérien...) reste à établir par les industriels eux-mêmes pour chiffrer exactement le gain en quantité de produit, eau et énergie. Ce travail ouvre également la voie à une réflexion générale sur le nettoyage des équipements à membrane et la formulation de solutions détergentes.

CONCLUSION

Les solutions pour économiser l'eau en agroalimentaire sont donc nombreuses. Mises en œuvre dans le cadre de processus industriel optimisés, elles offrent une perspective intéressante pour ménager la ressource en eau. Enfin, les usines des industries alimentaires restent aussi plus petites que celles de l'industrie lourde : elle peuvent constituer d'intéressants laboratoires pour explorer de nouveaux gisements d'économie.

FIN DU SUJET

1. plus une solution contient de matière organique, plus il faudra d'oxygène pour oxyder complètement cette matière organique ; on introduit ainsi la « demande chimie en oxygène » ou DCO comme grandeur caractéristique de la charge en matière organique.